第40卷 第6期
2023年6月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 6
Jun. 2023

降雨频率对甘南尕海湿草甸土壤碳氮磷化学计量特征的影响

关宇淇[1]， 李 广[1]， 潘 雪[2]， 徐国荣[1]， 魏星星[3]， 刘 昊[1]， 吴江琪[1]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 黑龙江省黑土保护利用研究院，黑龙江 哈尔滨 150000；
3. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃 兰州 730070）

摘 要：降雨是湿地水资源补给量和土壤呼吸的重要扰动因子，全球气候变化导致的未来极端降雨变率增大对湿地生态系统有着重要影响。为探究极端降雨频率下青藏高原湿草甸土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）含量及化学计量比的变化特征，本文以青藏高原东北边缘碌曲县尕海-则岔自然保护区境内的湿草甸土壤为研究对象，设置空白对照（CK：0 mm）、每周浇灌一次（DF1：25 mm×19次）、每两周浇灌一次（DF2：25 mm×9次）、每三周浇灌一次（DF3：25 mm×6次）和每四周浇灌一次（DF4：25 mm×4次）5种处理，分析极端降雨频率下0~40 cm土层土壤SOC、TN和TP化学计量特征的变化规律。结果表明：在不同降雨频率下，土壤SOC含量随降雨频率增加而增加，TN和TP含量则与之相反。在土壤垂直剖面上，SOC和TN含量均随土层深度增加而降低，TP含量随土层深度增加无显著变化；C:P和N:P均随土层加深有所降低，而C:N随土层加深无显著变化；C:N、C:P和N:P在不同降雨频率间差异不显著；此外，随着时间的推进，土壤SOC含量在生长季不同月份呈现先增后减的变化趋势，TN含量则呈现先减后增的变化趋势，而TP含量呈“M”型变化趋势。因此，随着全球降雨格局变化程度持续增加，较高的降雨频率会加剧高寒湿草甸浅层土壤氮磷含量的流失，造成高寒湿草甸水环境富营养化的危害加剧。

关键词：青藏高原；湿草甸；土壤化学计量特征；降雨频率

生态化学计量学（Ecological Stoichiometry, ES）是研究生态交互作用和过程中多种化学元素（主要是碳、氮、磷）平衡的科学[1]，为碳、氮和磷元素在生态系统中的耦合关系研究提供了有效手段，也为解决生态系统养分循环和揭示生物地球化学循环机制和植被养分限制提供了新思路[2]。碳、氮、磷是陆地生态系统中的重要养分[3]，同时也是植物生长所必需的元素，直接影响土壤微生物量及土壤养分的长期积累。外界环境的改变会引起土壤养分含量的变化，当土壤中碳、氮、磷元素缺乏或过量时，可根据化学计量比判断植物生长所受元素相对限制情况。因此，探究土壤养分含量及生态化学计量特征变化规律，对明晰生态系统养分平衡过程及其对环境变化的响应机制具有重要的意义[4]。

随着全球气候变化，未来全球降雨格局具有极大的不确定性，极端天气事件发生频率将日益增多，以高频降雨和高降雨量为主的极端降雨事件频发[5]，导致土壤水分和养分的有效性发生变化，对土壤养分含量及生态化学计量特征产生显著影响[6]。湿地是一种高度动态且复杂的陆地多功能生态系统，是海岸、河岸和湖岸陆地和水之间起缓冲和稳定作用的关键过渡纽带[7]。近年来，因气候变化而导致的极端降雨频发，使湿地土壤养分循环受阻，降低植被多样性，阻碍湿地生态系统的可持续发展[8]。研究表明，降雨量的增加降低了湿地土壤有机碳和全氮含量及氮磷比[9]，而高频降雨促进湿地土壤溶解性有机碳和铵态氮的分解转化，促进硝态氮的生成过程[10]，影响土壤有机碳矿化过程和土壤有机质分解速率[11]。也有研究发现，土壤有机碳、全氮和全磷含量对降雨频率变化的响应程度不显著[12]，这

收稿日期：2022-11-25； **修订日期：**2023-03-03
基金项目：甘肃省优秀研究生“创新之星”项目（2022CXZX-675）；甘肃省高等教育创新基金项目（2022A-052）；中国甘肃农业大学学科研启动项目（GAU-KYQD-2021-15）；甘肃省重点研发计划（22YF7FA116，20YF8NA135）
作者简介：关宇淇（1999-），女，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 54747750@qq.com
通讯作者：吴江琪. E-mail: 1462528657@qq.com

不仅与降雨变化后淋溶作用的大小有关[13],也与凋落物和根系分泌物的输入有关[14]。可见,降水格局的变化对土壤养分和生态化学计量特征影响的研究主要集中在降雨量或降雨频率的单一过程,且存在不一致性。因此,需进一步研究不同降雨频率和降雨量对土壤养分和化学计量时空分布特征的影响,为准确评估和预测未来降雨格局变化下高寒草甸土壤化学计量特征变化趋势,提出相关保护与管理措施,为高寒草甸生态系统可持续发展提供相关的理论依据。

目前,学者围绕生态化学计量学展开了大量研究,但这些研究多数围绕于室内培养实验、单纯调控土壤水分来探究不同土壤水分对土壤化学计量特征的影响,青藏高原作为全球变化敏感区和亚洲生态安全屏障[15],目前关于极端降雨背景下高寒湿草甸土壤化学计量特征的相关研究鲜有报道,严重缺乏对青藏高原湿草甸土壤养分循环的深入认识。因此,本文以青藏高原东北边缘的尕海-则岔自然保护区湿草甸为研究对象,通过设置极端降雨模拟实验,研究土壤化学计量特征对极端降雨频率的响应机制,及其与其他环境因子的关系,进而为青藏高原高寒湿草甸生态系统的可持续发展提供数据支撑。

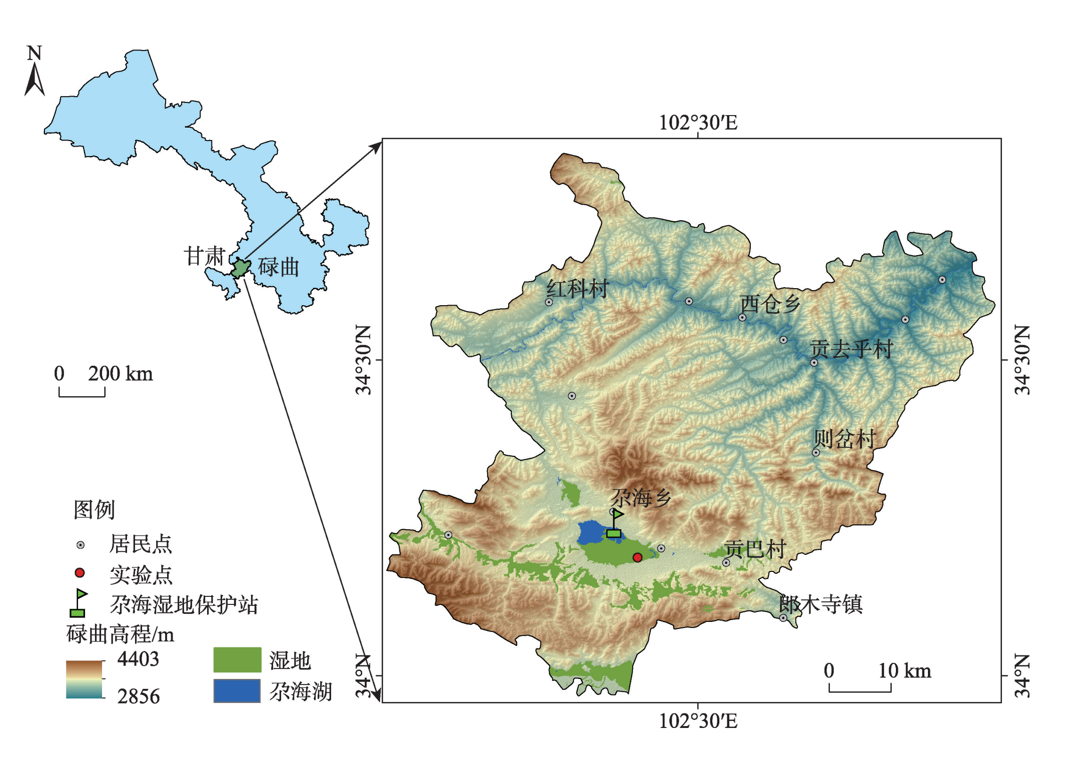
1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于青藏高原东北边缘碌曲县境内的甘肃尕海-则岔国家级自然保护区(102°05′~102°29′E,33°58′~34°30′N),海拔3430~4300 m(图1)。保护区湿地面积57846 hm^2,其中湿草甸面积51160 hm^2[16]。该区气候为青藏高原高寒湿润气候,最高气温出现在7月,平均为10.5 ℃,年均温1.2 ℃,年平均日较差13.7 ℃,最大年较差52.5 ℃。年降雨量781.8 mm,其中50%的降雨集中在7—9月。土壤类型主要为暗色草甸土、沼泽土和泥炭土等,有机质含量较高[17]。植物资源丰富,植物种类共42科107属187种,以多年生草本植物为主,主要有乌拉苔草(*Carex meyerina*)、线叶蒿(*Artemisia subulata*)、散穗早熟禾(*Poa subfastigiata*)、无脉苔草(*Carex enervis*)、蒿草(*Kobresia kansuensis*)等[18]。

1.2　试验设计

2019年5月,在尕海-则岔自然保护区境内,选择坡度平缓、植被类型一致的湿草甸为研究区域,



注:底图采用甘肃省自然资源厅标准地图制作,审图号为甘S(2023)2号,对底图边界无修改。

图1　研究区地理位置示意图

Fig. 1　The geographical location map of the study area

采用随机区组设计实验，共设置单个样方为2 m×2 m的15块样地，样地间间隔5 m。通过收集自然降雨，基于25 mm的浇灌量，设置5种不同梯度的降雨频率来模拟该地区的极端降雨输入[19-20]：只接收自然降雨（CK）、每周浇灌一次（DF1）、每两周浇灌一次（DF2）、每三周浇灌一次（DF3）和每四周浇灌一次（DF4），共5个处理，每个处理重复3次。在2019年5—10月的植物生长季节，模拟自然降雨控制雨强进行浇灌，以避免产生冲刷效应，同时所有处理均接受自然降雨。每次补充浇灌的水量相当于25 mm的自然降雨量，不同降雨频率的总补充浇灌量为：空白对照0 mm（25 mm×0次）、每周浇灌（DF1）75 mm(25 mm×19次)、每两周(DF2)浇灌225 mm(25 mm×9次)、每三周浇灌（DF3）150 mm(25 mm×6次)、每四周(DF4)浇灌100 mm(25 mm×4次)。

1.3 样品采集与测定

于2019年5—10月每月中旬，清除地表枯落物后，在15块样地中采用“蛇”型7点法用土钻取0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤样品，同处理相同土层土壤组成一个混合土样（3重复）带回实验室内，捡去石块、残根等杂物后将土样过2 mm筛，置于4 ℃冰箱保存。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定，土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定，土壤全磷含量采用钼锑抗比色法测定[21]，植被地上生物量在9月采集使用传统收获法，首先将试验样方内所有植物从基部用剪刀剪下，带回实验室经105 ℃杀青处理后（约30 min），置于65 ℃烘箱中加热烘干至恒重称重即得到最佳的烘干质量。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel进行数据分析整理，SPSS 22进行统计分析，Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

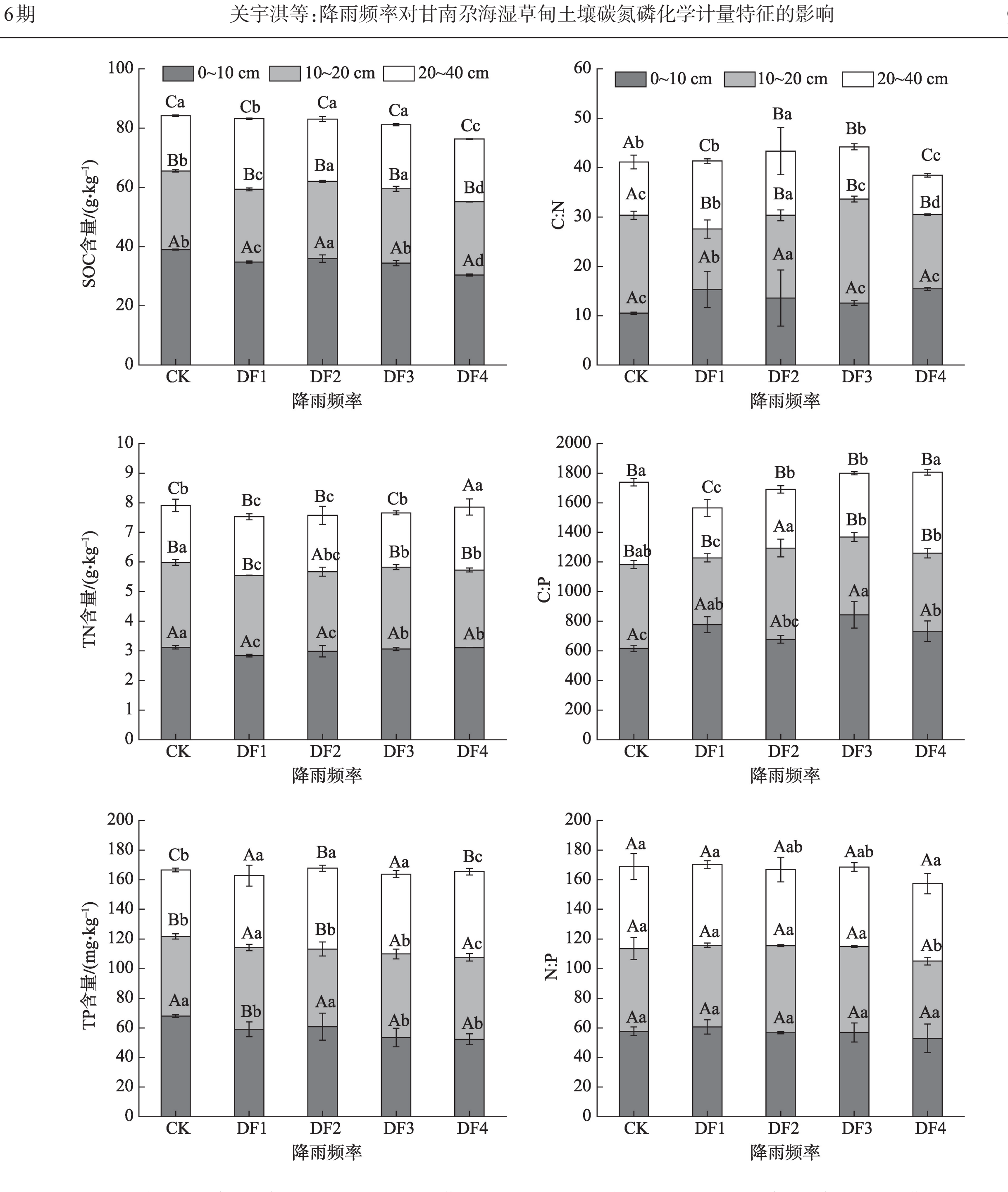
2.1 极端降雨频率对土壤化学计量特征的影响

由图2可知，在同一降雨频率下，SOC、TN、TP含量在不同土层间存在显著差异（$P<0.05$），且SOC、TN含量均具有表聚特征，具体表现为0~10 cm土层最大，且随土层加深而降低。在不同降雨频率之间，土壤SOC、TN含量随降雨频率增加而增加，TP含量随降雨频率增加而减少，且0~10 cm土层土壤SOC含量在DF1处理下最高（38.8 g·kg^{-1}），10~20 cm土层和20~40 cm土层土壤SOC含量均在DF2处理下最高（26.1 g·kg^{-1}、20.6 g·kg^{-1}）；0~10 cm土层土壤TP含量在CK处理下最高（63.4 g·kg^{-1}），10~20 cm土层和20~40 cm土层土壤TP含量均在DF4处理下最高（58.9 g·kg^{-1}、54.9 g·kg^{-1}）；对于土壤TN含量而言，则在0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm层均为CK处理最高，依次为3.2 g·kg^{-1}、2.8 g·kg^{-1}、2.0 g·kg^{-1}。

在同一降雨频率梯度下，土壤C:P、N:P均随土层的加深而降低，C:N无一致性变化规律，除了C:P在0~10 cm土层显著高于20~40 cm（$P<0.05$），其余土层C:N、C:P、N:P间均无显著差异。在0~40 cm土层，土壤C:N、C:P、N:P的比值变化范围分别为10.02~23.53、344.72~797.28和38.52~80.24。方差分析表明（表1），土壤SOC、TN和TP含量在不同降雨频率、不同土层、不同月份间差异均显著（$P<0.01$）；因土壤SOC、TN和TP含量受主导因素的不同，C:N、C:P、N:P在受降雨频率、土层及月份单一因素作用下表现出不同水平的显著差异（$P<0.01$）；在降雨频率、土层及月份3种因素间两两交互作用及3种因素共同作用下土壤SOC、TN和TP及C:N、C:P、N:P均表现出极显著差异（$P<0.01$）。由图3可知，在不同降雨频率梯度下，与CK相比，除DF4处理外，其余各处理间地上生物量差异均显著（$P<0.05$）。

2.2 不同降雨频率下土壤养分的季节动态变化特征

如图4所示，不同降雨频率下SOC、TN、TP含量整体上具有明显的时间变化，其中SOC含量随时间变化呈现先增后减的变化趋势，8月出现最高值，各处理的最高值依次为：DF1（42.74 g·kg^{-1}）＞DF2（38.91 g·kg^{-1}）＞DF3（30.24 g·kg^{-1}）＞DF4（30.22 g·kg^{-1}）＞CK（29.21 g·kg^{-1}）；10月出现最低值，各处理的最低值依次为：DF2（22.31 g·kg^{-1}）＞CK（20.77 g·kg^{-1}）＞DF3（16.37 g·kg^{-1}）＞DF1（15.65 g·kg^{-1}）＞DF4（14.02 g·kg^{-1}）。TN含量随季节变化呈现先减后增的变化趋势，7月出现最低值（0.98 g·kg^{-1}），各处理的最低值依次为：DF2（22.31 g·kg^{-1}）＞CK（20.77 g·kg^{-1}）＞DF3（16.37 g·kg^{-1}）＞DF1（15.65 g·kg^{-1}）＞DF4（14.02 g·kg^{-1}）。TP含量随季节变化呈“M”型趋势，5—6月和7—8月呈上升趋势，6—7月和8—10月呈下降趋势，6月达到最高点，10月达到最低点。



注:大写字母表示相同降雨频率下不同土层间差异显著(P<0.05),小写字母表示同一土层下不同降雨频率间差异显著(P<0.05);误差线表示不同处理间的标准误差。

图2　不同降雨频率下土壤化学计量特征

Fig. 2　Soil stoichiometry characteristics under different rainfall frequencies

2.3 不同降雨频率下土壤养分与化学计量比的相关分析

如图5所示,土壤SOC与土壤TN、TP、C:N、C:P存在极显著正相关关系(P<0.01),与N:P存在极显著负相关关系(P<0.01)。TN与C:N间存在极显著负相关关系(P<0.01),与N:P间存在极显著正相关关系(P<0.01)。TP与C:P存在极显著负相关关系(P<0.01),与N:P存在极显著负相关关系(P<0.01)。C:N与N:P存在极显著负相关关系(P<0.01),C:P与N:P间存在显著正相关关系(P<0.01)。

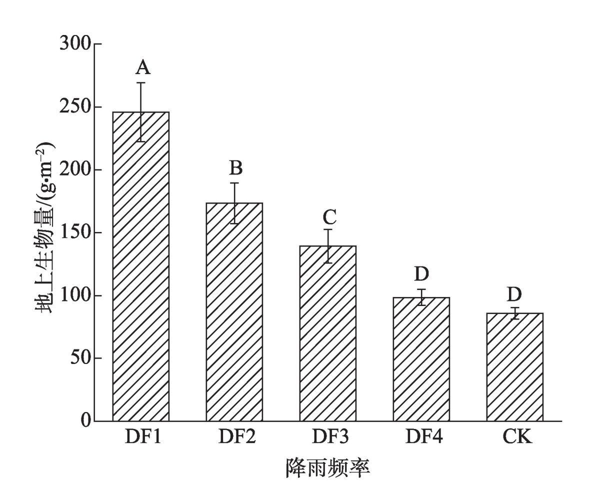
通过对地上生物量与土壤有机碳、全氮、全磷之间进行回归分析发现,地上生物量对土壤SOC含

表1 处理方式、土层、月份对土壤生态化学计量特征影响的方差分析

Tab. 1 Analysis of variance for the effect of treatments, soil layer, and month on soil ecological chemometric characteristics

方差来源		SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
降雨频率	自由度	4	4	4	4	4	4
	*F*值	522.055	240.096	58.947	202.930	4.318	204.931
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
土层	自由度	2	2	2	2	2	2
	*F*值	3341.065	119.452	11.545	66.519	133.260	9.001
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
月份	自由度	5	5	5	5	5	5
	*F*值	47.385	29.222	8.958	18.609	13.783	41.572
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
降雨频率×土层	自由度	8	8	8	8	8	8
	*F*值	16.471	21.120	13.321	207.342	11.465	25.543
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
降雨频率×月份	自由度	20	20	20	20	20	20
	*F*值	154.343	79.503	24.511	49.565	13.572	27.815
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
土层×月份	自由度	10	10	10	10	10	10
	*F*值	12.926	23.899	6.066	84.531	4.110	12.054
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
降雨频率×土层×月份	自由度	40	40	40	40	40	40
	*F*值	27.670	24.977	12.802	10.999	10.584	15.810
	*P*值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注：$P<0.01$表示极显著，$P<0.05$表示显著。



注：大写字母表示不同降雨频率下地上生物量差异显著，误差线表示不同处理间的标准误差。

图3 不同降雨频率下地上生物量

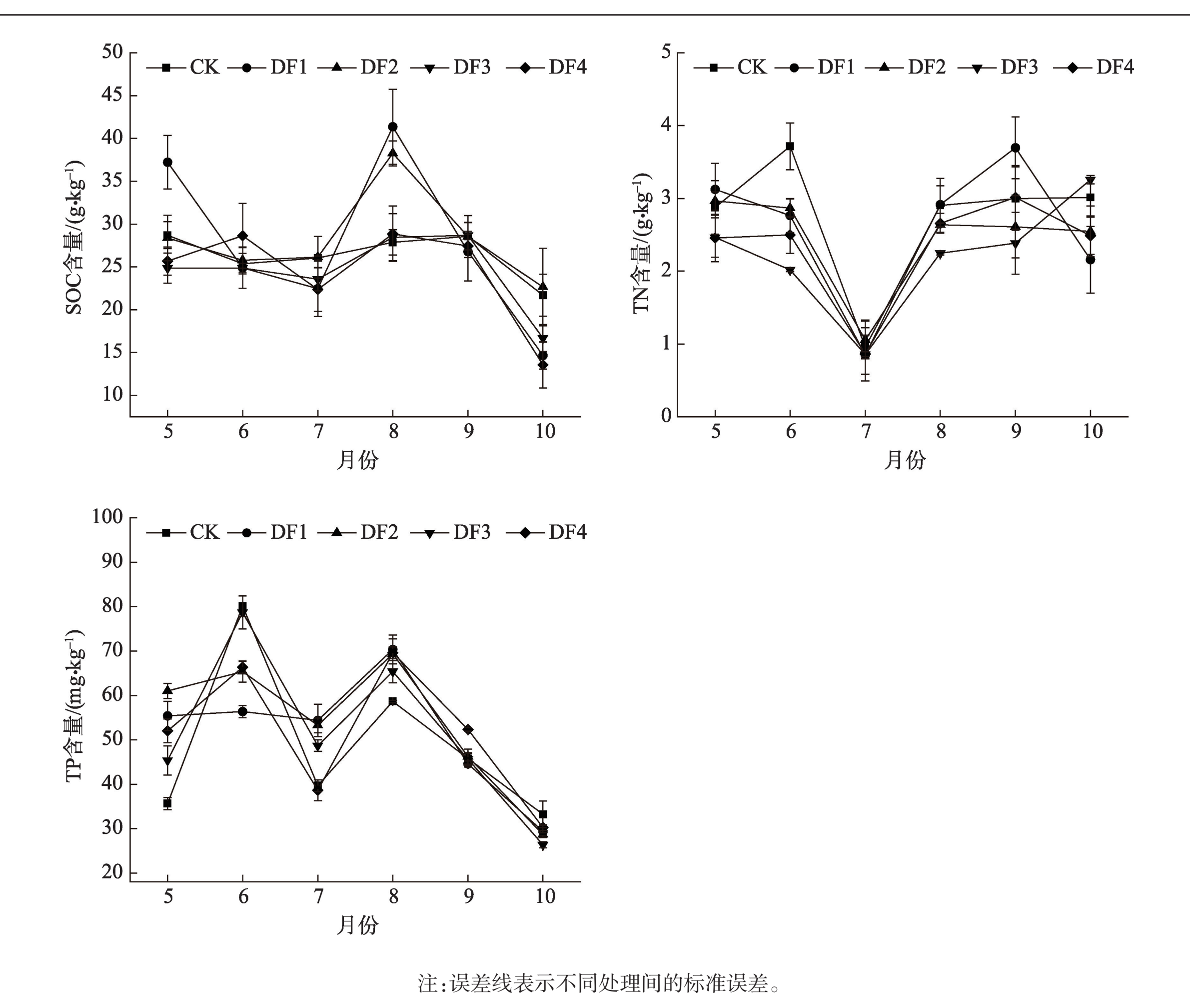
Fig. 3 Aboveground biomass under different rainfall frequencies

量解释程度高，拟合程度好（R^2=0.5115；图6），对土壤TP含量解释程度较高，拟合程度好（R^2=0.0859；图6），而地上生物量与TN含量解释程度低，拟合程度差（R^2=0.0301；图6）。其中，SOC与地上生物量的回归方程为：y=0.0183x+21.793（R^2=0.5112），TN与地上生物量的回归方程为：y=0.0059x+23.761（R^2=0.0301），TP与地上生物量的回归方程为：y=0.0162x+51.057（R^2=0.0859）。

3 讨 论

3.1 不同降雨频率下土壤养分化学计量特征差异

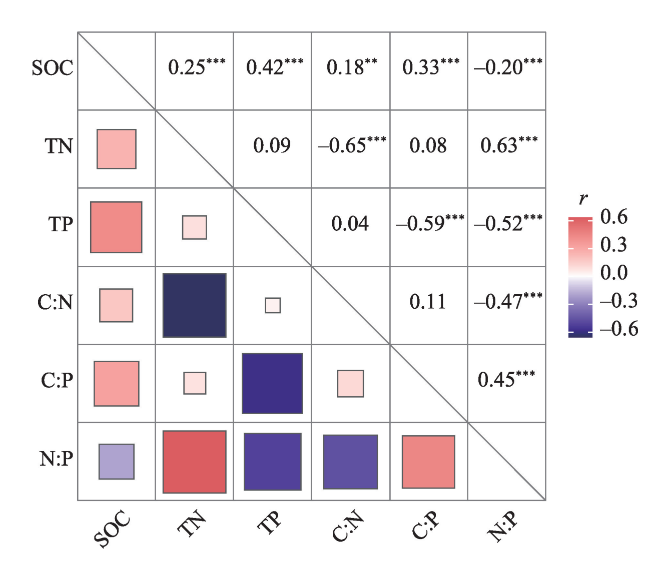
土壤有机碳是影响陆地生态系统生产力和全球气候变化的重要土壤成分[22]，土壤氮、磷是植物生长必需的矿质养分和关键的限制元素[23]，三者之间的相互作用对维持生态系统平衡发挥着重要作用[24]。本研究发现，土壤SOC、TN在土层中的分布规律稳定，主要集中在0~10 cm土层中，且土壤SOC、TN含量随着土层深度的增加而减小[25-27]，TP含量在土壤垂直剖面上分布稳定。这是由于土壤中有机碳和全氮主要来源于地上植被凋落物、动物及微生物死亡躯体分解[27-28]，此外，土壤中还有一部



注:误差线表示不同处理间的标准误差。

图4 不同降雨频率(0~40 cm)土壤养分含量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of soil nutrient content with different rainfall frequencies



注:*在P<0.05水平(双侧)上显著相关,**在P<0.01水平(双侧)上极显著相关,***在P<0.001水平(双侧)极显著相关。

图5 不同降雨频率下土壤养分与化学计量比的相关关系

Fig. 5 Correlation analysis of soil nutrients and stoichiometric ratios with different rainfall frequencies

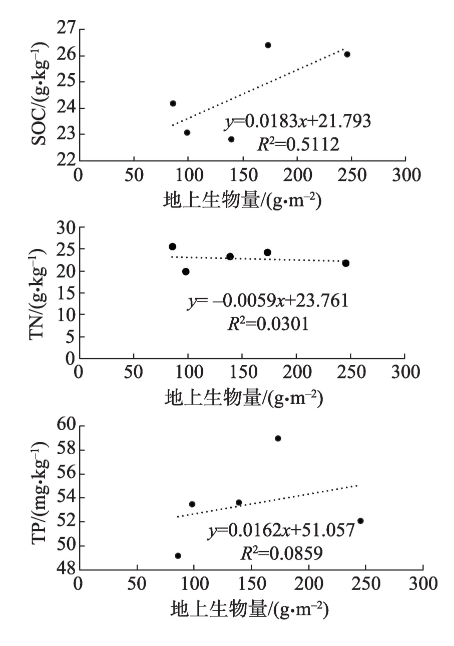


图6 地上生物量与SOC、TN和TP的线性关系

Fig. 6 Linear relationship between aboveground biomass and SOC, TN and TP

分氮素来源于大气干湿氮沉降，研究区内主要以草本植物为主，且由于研究区位于国家自然保护区内，受食草动物啃食践踏和人为活动干扰小，植被生长旺盛，而草本植物根系集中于土壤表层0~20 cm处，因此，表层土壤具有凋落物层较厚和腐朽根系密集的优势，进而大量凋落物和密集根系为腐殖质分解、有机质合成过程提供丰富原料来源[29]，随土层深度的增加，枯落物的输入量与植被根系减少，微生物数量与活性下降，其分解速率降低，可供降解的有机质变少，土壤SOC、TN含量随之降低。因此，土壤中有机碳、全氮含量首先表现在表层土壤富集现象；后随外营力作用在不同介质中向下迁移扩散，形成了土壤有机碳和全氮随土壤剖面垂直深度的增加而减小的分布格局；土壤中的磷是一种沉积性矿物，主要来源于母岩风化和有机质输入[30]，在浅层土壤中风化程度差异不大[25]，因此，土壤全磷在土层垂直分布上较稳定。

土壤C:N:P比值是阐明营养限制和表征生态过程的一个重要指标[31]。研究结果表明，不同降雨频率下土壤C:P和N:P均随土层的加深而有所降低，这与罗亚勇等[32]在青藏高原东端玛曲县的研究结论相似，这是因为土壤有机碳、全氮含量表现为随土层加深而递减的规律，而土壤TP具有相对稳定的垂直分布[33]，故土壤C:P和N:P比值随土壤深度加深而降低。我国土壤C:N、C:P、N:P的平均值分别为12、61和5[34]，而本试验得出的土壤C:N、C:P、N:P的比值变化范围分别为10.02~23.53、344.72~797.28和38.52~80.24，C:N是能够反映土壤有机质分解速度的重要指标之一[12]，其比值与土壤有机质的分解速度成反比，土壤C:P能够反映出土壤中磷的有效性，土壤N:P可以判断土壤养分在植物生长过程中的供应情况，而与我国土壤化学计量比均值对比下试验区内C:P、N:P过高，这说明研究区土壤中磷元素匮乏。

本研究表明，在极端降雨频率下，土壤SOC、TN含量随降雨频率增加而增加，TP含量随降雨频率增加而减少,这是因为干湿交替次数的增加使有机碳累计矿化量减少[35]，增加降雨频率相较于其对照处理，土壤中经历的干湿交替过程更加频繁，有机碳矿化量减小，使得土壤有机碳含量随降水频率的增加而累积。但也有学者认为，频繁干湿交替会增加土壤有机碳矿化速率，排放更多的CO_2[36]，朱湾湾等[9]对宁夏荒漠草原土壤生态化学计量特征研究发现，降雨增加显著降低了SOC含量，这可能是因为研究区域不同的土壤、水文条件所致。土壤中磷的流失主要由淋溶造成[37]，土壤含水量增加使得磷淋溶损失增多，此外部分磷被植物根系吸收[38]，一定程度内的含水量增加促使植物磷消耗增加。综上所述，降雨频率的增加使得土壤中TP损失程度加剧。本研究表明，SOC、TN、TP含量在不同降雨频率间差异均显著，这表明降雨频率的变化对土壤化学计量特征具有一定程度的影响。

3.2 土壤养分季节动态变化特征

土壤碳氮磷化学计量特征主要受气候状况、成土母质、地形地貌、土壤类型和生物条件等成土因素和水热条件的影响[39]。本研究发现，不同降雨频率下SOC、TN、TP含量在整个植物生长期具有明显的季节变化。由于湿地中的植物多受氮、磷营养限制，其对环境温度和氮、磷可利用性的变化具有更高的敏感性[40]，所以在植物生长期内土壤养分含量变化幅度较大。本研究中，土壤SOC含量在不同季节存在明显变化趋势，5—8月大部分前一年未完全分解的叶、枝和根等死亡残体在水分和温度条件较好的情况下，通过腐殖化过程进入土壤[41]，同时发育中的植物会向外释放根系分泌物或凋落物[42]，以至土壤中有机碳含量提高；8—10月研究区因日温差较大，土壤经历频繁的冻融交替，有机物被矿化分解和释放，加之降水的淋溶作用使有机碳大量流失[43]，造成土壤中有机碳含量降低。土壤全氮含量在7月出现了最低值，这是因为7月植物进入生长旺期，对土壤养分需求大，加之温度较高，土壤呼吸速率加强[44]，根系生理代谢过程加快，微生物利用氮源较多，所以，此时TN含量为全年最低，随着植物生长进入末期（9—10月），研究区地表富集了大量的枯枝落叶，其进一步分解的产物返还到土壤，进而土壤氮素含量逐步上升。本研究发现，全磷含量以6月、8月为拐点呈“M”型趋势，其原因在于植物可以通过根系来吸收和同化土壤中的磷，将其转变成自身体内的核酸、磷脂类化合物等有机成分。当植物地上部分快速生长时，根或根茎会从土壤中吸收大量磷，以供给植物生长所需，这使土壤中全磷含量降低。在生长季末期，自然降水减少，环境温度变低，植物生长速率减慢并趋于停滞，植物地上部分的养分逐步向土壤归还，使土壤全磷含量逐

步增加。

4 结 论

基于青藏高原湿草甸极端降雨频率下土壤养分含量及其化学计量比的特征分析，研究了极端降雨频率对土壤SOC、TN、TP以及C:N、C:P、N:P的影响规律，结论如下：

（1）降雨频率增加有利于土壤有机碳的积累，但会造成氮磷元素的流失。土壤有机碳、全氮含量随土壤剖面垂直深度的增加而减小；全磷含量垂直变化小且分布稳定。

（2）土壤C:P和N:P比值垂直分布具有一致性，随土层加深而降低，C:N在土层间较稳定，另外，由土壤化学计量比可知，研究区磷元素匮乏，植物生长主要受磷限制。

（3）SOC和TN含量随时间变化呈现先增后减的变化趋势，TP含量随时间变化呈"M"型变化趋势。

参考文献(References)：

[1] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602. [Gao Junliang, Luo Fengmin, Gao Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture- pasture ecotone of Northern China[J].Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5594-5602.]

[2] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to The Biosphere[M]. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere, 2002: 41-102.

[3] 刘岑薇, 郑向丽, 王俊宏, 等. 陆生和水域生态系统植物的C、N、P生态化学计量特征研究综述[J]. 中国农学通报, 2017, 33(17): 70-75. [Liu Cenwei, Zheng Xiangli, Wang Junhong, et al. Reviews on ecological stoichiometry characteristics of C, N, P in terrestrial and aquatic plants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(17): 70-75.]

[4] 张昊, 李建平, 王誉陶, 等. 封育与放牧对黄土高原天然草地土壤化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 251-258. [Zhang Hao, Li Jianping, Wang Yutao, et al. Effect of enclosure and grazing on the soil stoichiometry characteristics of natural grassland on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 251-258.]

[5] Zhou B T, Chao Q C, Huang L. The core conclusions and interpretation of working group Ⅰ contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2015, 3(1): 46-52.

[6] Singh D, Tsiang M, Rajaratnam B, et al. Precipitation extremes over the continental United states in a transient, high-resolution, ensemble climate model experiment[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(13): 7063-7086

[7] Endter-Wadaa J, Karin M Kettenring, Ariana Sutton-Grier. Protecting wetlands for people: Strategic policy action can help wetlands mitigate risks and enhance resilience[J]. Environmental Science and Policy, 2020, 108(C): 37-44.

[8] 陈新永. 干湿交替对人工湿地生态系统氮代谢影响的机理及其生态模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020. [Chen Xinyong. Study on Mechanism and Ecological Model of Nitrogen Metabolism in Constructed Wetland Ecosystem Affected by Dry-wet Alternation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.]

[9] 朱湾湾, 王攀, 樊瑾, 等. 降水量及N添加对宁夏荒漠草原土壤C:N:P生态化学计量特征和植被群落组成的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(9): 33-44. [Zhu Wanwan, Wang Pan, Fan Jin, et al. Effects of precipitation and N addition on soil C:N:P ecological stoichiometry and plant community composition in a desert steppe of Ningxia, northwestern China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(9): 33-44.]

[10] 张泽洲, 王冬梅, 李梦寻, 等. 干湿交替程度对土壤速效养分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 265-270. [Zhang Zezhou, Wang Dongmei, Li Mengxun, et al. Effect of alternation degree of drying and wetting on soil available nutrients[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 265-270.]

[11] Chu X J, Han G X, Wei S Y, et al. Seasonal not annual precipitation drives 8-year variability of interannual net CO_2 exchange in a salt marsh[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 123(6): 308-309.

[12] 王誉陶, 李建平, 井乐, 等. 模拟降雨对黄土高原典型草原土壤化学计量及微生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1517-1531. [Wang Yutao, Li Jianping, Jing Le, et al. Effects of different precipitation treatments on soil ecological chemistry and microbial diversity in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1517-1531.]

[13] Samuel Bartels. Water supply changes N and P conservation in a perennial grass leymus chinensis[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2009, 51(11): 1050-1056.

[14] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7996-8002. [Li Jiajia, Fan Miaochun, Shangguan Zhouping. Ecostoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of Robinia pseudoacacia forest on the north-south strip of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7996-8002.]

[15] Zhao Zhilong, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Recent changes in wetlands on the Tibetan Plateau: A review[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7): 879-896.

[16] 马维伟, 王辉, 王跃思, 等. 甘南尕海草甸湿地不同海拔高度土壤性状研究[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1044-1050. [Ma Weiwei,

Wang Hui, Wang Yuesi, et al. Soil properties of meadow wetlands for different altitudes in Gahai of Gannan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1044–1050.]

[17] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 尕海湿草甸不同地下水位土壤理化特征的比较分析[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 341–347. [Wu Jiangqi, Ma Weiwei, Li Guang, et al. Comparative analysis of physicochemical property of soil with different groundwater level in Gahai swamp meadow wetlan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 341–347.]

[18] 辛玉梅, 史静, 武慧娟, 等. 碌曲县尕海湿地植物资源及区系研究[J]. 青海草业, 2012, 21(Z1): 55–57, 35. [Xin Yumei, Shi Jing, Wu Huijuan, et al. Research of vrgrtsion resources and district in Luqu County[J]. Qinghai Prataculture, 2012, 21 (Z1): 55–57, 35.]

[19] Fan J, Sun W, Zhao Y, et al. Trend analyses of extreme precipitation events in the Yarlung Zangbo River Basin, China using a high-resolution precipitation product[J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1396–1396.

[20] Wu J Q, Wang H Y, Li G, et al. Responses of CH_4 flux and microbial diversity to changes in rainfall amount and frequencies in a wet meadow in the Tibetan Plateau[J]. Catena, 2021, 202: 105253.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Agrochemical Analysis of Soil[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.]

[22] Rawls W J, Pachepsky Y A, Ritchie J C, et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention[J]. Geoderma, 2003, 116(1–2): 61–76.

[23] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau[J]. Geoderma, 2009, 150(1–2): 141–149.

[24] Michaels A F. Biogeochemistry: The ratios of life[J]. Science, 2003, 300(5621): 906–907.

[25] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988–2996. [Li Ting, Deng Qiang, Yuan Zhiyou, et al. Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2988–2996.]

[26] 张宏斌, 孟好军, 赵维俊, 等. 黑河流域中游芦苇湿地土壤碳垂直分布特征[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 123–127. [Zhang Hongbin, Meng Haojun, Zhao Weijun, et al. Vertical distribution characteristics of soil carbon of reed wetland in middle region of Heihe Basin[J]. Ecological Science, 2016, 35(2): 123–127.]

[27] 刘兴华, 陈为峰, 段存国, 等. 黄河三角洲未利用地开发对植物与土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 204–208. [Liu Xinghua, Chen Weifeng, Duan Cunguo, et al. Effect of exploitation of unutilized land on ecological stoichiometry characteristics of plants and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 204–208.]

[28] 赵云飞, 洪苗苗, 欧延升, 等. 青藏高原东部山地草地土壤碳、氮、磷元素计量特征[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 25–32. [Zhao Yunfei, Hong Miaomiao, Ou Yansheng, et al. The stoichiometric characteristics of soil C, N, P in mountain steppe of eastern Tibetan Plateau[J]. Ecological Science, 2018, 37(5): 25–32.]

[29] 李国荣, 李希来, 陈文婷, 等. 降雨侵蚀对退化草地土壤养分含量的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 40–45. [Li Guorong, Li Xilai, Chen Wenting, et al. Influences of rain erosion on soil nutrient contents of the deteriorated grassland[J]. Research on Water and Soil Conservation, 2018, 25(2): 40–45.]

[30] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. [Li Bo, Yang Chi, Lin Peng. Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.]

[31] Sun Y, Wang C T, Luo X S, et al. Asymmetric responses of terrestrial C:N:P stoichiometry to precipitation change[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(8): 1724–1735.

[32] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 254–260. [Luo Yayong, Zhang Yu, Zhang Jinghui, et al. Soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degradation stages[J] Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 254–260.]

[33] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400–408. [Feng Defeng, Bao Weikai. Review of the temporal and spatial patterns of soil C:N:P stoichiometry and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(2): 400–408.]

[34] Tian H, Chen G, Chi Z, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(s1–3): 139–151.

[35] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(2): 339–347.

[36] Borken W, Davidson E A, Savage K, et al. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1888–1896.

[37] Ren H, Xu Z, Huang J, et al. Nitrogen and water addition reduce leaf longevity of steppe species[J]. Annals of Botany, 2011, 107(1): 145–155.

[38] Rupp H, Meissner R, Leinweber P. Plant available phosphorus in soil as predictor for the leaching potential: Insights from long-term lysimeter studies[J]. Ambio: A Journal of the Human Environment, 2018, 47(S1): 103–113.

[39] 贺合亮, 阳小成, 王东, 等. 青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P生态化学计量学特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(6): 1128–1135. [He Heliang, Yang Xiaocheng, Wang Dong, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub in eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(6): 1128–1135.]

[40] 宋长春, 宋艳宇, 王宪伟, 等. 气候变化下湿地生态系统碳、氮循环研究进展[J]. 湿地科学, 2018, 16(3): 424−431. [Song Changchun, Song Yanyu, Wang Xianwei, et al. Advance in researches on carbon and nitrogen cycles in wetland ecosystems under climate change[J]. Wetland Science, 2018, 16(3): 424−431.]

[41] Wang H, Mo J M, Liu S R, et al. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China[J]. Ecological Research, 2010, 25(6): 1071−1079.

[42] Sardans J Penuelas. Plant-soil interactions in mediterranean forest and shrublands: Impacts of climatic change[J]. Plant and Soil, 2013, 365(1−2): 1−33.

[43] 范志平, 王琼, 李法云. 辽东山地不同森林类型土壤有机碳季节动态及其驱动因子[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3220−3230. [Fan Zhiping, Wang Qiong, Li Fayun. Seasonal dynamics of soil organic carbon in different forest types and its driving factors in mountainous region of eastern Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(11): 3220−3230.]

[44] 陈怀璞, 张天雨, 葛振鸣, 等. 崇明东滩盐沼湿地土壤碳氮储量分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(3): 242−251. [Chen Huaipu, Zhang Tianyu, Ge Zhenming, et al. Distribution of soil carbon and nitrogen stocks in salt marsh wetland in Dongtan of Chongming[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(3): 242−251.]

Effects of changing rainfall frequency on the soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecostochimetrics in the Gahai wet meadow, Gannan

GUAN Yuqi[1], LI Guang[1], PAN Xue[2], XU Guorong[1], WEI Xingxing[3], LIU Hao[1], WU Jiangqi[1]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Heilongjiang Research Institute of Black Soil Protection and Utilization, Harbin 150000, Heilongjiang, China; 3. Lanzhou Institute of Drought Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Rainfall is an important factor affecting water supply and soil respiration in wetland areas. Increases in extreme rainfall variability caused by global climate change are thus expected to impact wetland ecosystems. To investigate this, the changes in soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in response to altered rainfall frequencies (weekly, fortnightly, three- weekly, four- weekly, and control irrigation treatments) were assessed in a wet meadow in the Gahai-Zecha Nature Reserve on the north-eastern edge of the Tibetan Plateau. The SOC was found to increase with increasing rainfall frequency, while TP and TN decreased. SOC and TN decreased with increasing soil depth and TP was inconsistent across the different soil layers. As a result, the ratios of C:P and N:P decreased with the soil layers, but the ratio of C:N did not show a significant change. The ratios of C:N, C:P, and N:P did not show significant responses to the rainfall treatments. The SOC, TN, and TP showed obvious seasonal variations, as the SOC showed an increasing and then decreasing trend, the TN showed a decreasing and then increasing trend, and the TP content showed an “M”-shaped decreasing trend. The results suggest that continuous changes in global rainfall, including an increased rainfall frequency, will aggravate the loss of nitrogen and phosphorus in the shallow soil of the alpine wet meadow, likely resulting in aggravated damage due to eutrophication in the water environment surrounding the alpine wet meadows.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; wet meadows; soil stoichiometric characteristics; rainfall frequency